4Г

УДК 004.896

М.А. Габидулин
Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), г. Москва, Россия
gabidulin_ma@mail.ru

Фотоэлектрические цифровые преобразователи перемещений пространственного кодирования

Рассмотрены пути совершенствования фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений пространственного кодирования. Даны анализ и синтез их обобщенных структур.

Введение

Совершенствование мехатронных средств автоматизации и управления на основе интеллектуальных технологий [1] неразрывно сопряжено с ужесточением требований к характеристикам цифровых электроприводов, одним из важнейших и ответственных элементов которых являются цифровые преобразователи перемещений, широко используемые в качестве датчиков обратной связи [2]. Создание приводов, отвечающих современным требованиям, предъявляет повышенные требования к преобразователям перемещений [3], среди которых наибольшие потенциальные возможности дальнейшего совершенствования имеют фотоэлектрические цифровые преобразователи перемещений (ФЦПП), превосходящие другие типы преобразователей по точности, быстродействию и технологичности [4].

В зависимости от принципа, положенного в основу построения, ФЦПП подразделяются на абсолютные и накапливающие (инкрементные) преобразователи (АФЦПП, НФЦПП) [5]. В АФЦПП цифровой эквивалент формируют первичные сигналы, считываемые в момент преобразования с пространственных растровых или кодовых шкал. В НФЦПП первичные сигналы формируют импульсы единичных приращений цифрового эквивалента и их знак (характер его изменения). Поэтому их можно охарактеризовать как усеченные обычно до двух младших разрядов структуры АФЦПП и дополненные маркерным каналом для установки начала отсчета [6]. Такое построение значительно упрощает и удешевляет конструкцию и повышает ее технологичность в изготовлении, что является причиной широкого распространения накапливающих преобразователей в настоящее время [5].

Однако в ответственных применениях, требующих повышенной достоверности цифрового эквивалента и эксплуатационных характеристик, используются АФЦПП. Из них широкое распространение получили [7] ФЦПП пространственного кодирования, основанные на считывании разрядных цифр двоичного кода непосредственно с кодовой маски и называемые поэтому также преобразователями считывания [8]. Их характеристики в значительной степени зависят от кода, определяющего рисунок кодовой маски, и метода устранения неоднозначности считывания [3], [4].

Постановка задачи

В последнее время благодаря успехам оптоэлектроники из существующих преобразователей перемещений наиболее интенсивно и динамично развиваются преобразователи на фотоэлектрическом принципе, что объясняется их высокой технологичностью, прецизионностью, малой инерционностью, бесконтактностью и рядом других конкурентных преимуществ, органично присущих используемым в них физическим явлениям [9]. Однако достижение этих преимуществ из-за чрезвычайно широкого диапазона предъявляемых требований, сферы и масштабов применений представляет сложную научно-техническую задачу [3], [4]. Вместе с тем выпускаемые изделия не обеспечивают потребности в ряде новых применений, что делает актуальной задачи дальнейшего повышения их качества и интенсификации исследований по поиску и разработке новых технических решений, более полно реализующих высокие потенциальные возможности известных или основанных на новых принципах построения преобразователей. Так, например, в зависимости от условий применения на первый план могут выдвигаться самые разнообразные эксплуатационные требования (по точности, быстродействию, надежности, стойкости к воздействию внешних возмущений, долговечности, стоимости, энергопотреблению, массогабаритным размерам и т.д.).

Из известных принципов построения АФЦПП, основанные на формировании кода непосредственно из первичных сигналов, считываемых с пространственных кодовых шкал, отличаются при высокой точности и быстродействии максимальным упрощением электронного блока, состоящего из набора компараторов и в случае необходимости – преобразователя кодов/дешифратора. Поэтому такие ЦПП широко используются с момента появления цифровых систем контроля и управления [3-11] по настоящее время.

Однако с прогрессом в области техники преобразования сигналов и ужесточения точностных требований наибольшее внимание уделялось развитию ЦПП с промежуточными преобразованиями на основе первичных сигналов формата СКВТ [3] и растровых синусно-косинусных преобразователей (СКП) [4]. Развита [8], [12], [13] теория и схемотехника многоотсчетных преобразователей, состоящих из каналов грубого, среднего и точного отсчетов (ГО, СО и ТО). При этом наиболее полно и детально изучены многопериодные структуры каналов ТО и СО, состоящие из последовательно соединенных растрового СКП и АЦП пространственной фазы, но детальные и комплексные исследования структур ГО, основанных на считывании кода с кодовых шкал, не производились. Существующая классификация ЦПП пространственного кодирования [14], основанная на делении их на шкальные, матричные и шкально-матричные структуры, недостаточно полно отвечает задачам структурного синтеза и оптимизации многоотсчетных преобразователей, актуальность которых отмечалась многими известными специалистами. Перспективным является путь создания блочно-модульных структур на основе комбинирования базовых простейших структур, основанных на классических традиционных методах и принципах построения. Однако до сих пор не разработаны процедуры, позволяющие формализовано синтезировать «сложные» образования структур из простейших элементарных. Разработаны лишь частные процедуры, методы и принципы, к числу которых относятся принципы построения многоотсчетных преобразователей [8], [12], одной разновидности шкально-матричных преобразователей [14], преобразователей с ассоциативным считыванием [15], двух- и трехдорожечных преобразователей с комбинаторными шкалами [16] и др.

Таким образом, как показывает опыт исследований и разработок в данной области, представляет несомненный интерес произвести обобщение многоотсчетных преобразователей на случай ЦПП пространственного кодирования для выявления новых радикальных и плодотворных путей их дальнейшего совершенствования.

С этой целью в статье на основе ретроспективного обзора и анализа [7-11] и собственных результатов [4-6], [13], [17], [18] рассмотрены пути совершенствования ЦПП в нормальный n-разрядный двоичный код и решена задача синтеза обобщенных блочно-модульных структур, что необходимо при решении частной задачи выбора структуры, наилучшим образом отвечающей конкретным поставленным требованиям.

Анализ базовых принципов построения

С целью решения поставленной задачи произведем анализ эффективности применения в кодовых масках различных первичных кодов и методов устранения неоднозначности для случая построения ЦПП в нормальный двоичный n-разрядный код, функция преобразования которого в общем виде выражается соотношением

$$N = Ent\left[\frac{x}{q}\right], q = \frac{D}{H}, N \in \{0, 1, \ldots, H-1\},$$

где q – шаг квантования, D – диапазон перемещений, H – число уровней квантования (мощность кода N).

Рассматривались случаи оцифровки кодовой маски в безизбыточных нормальном и отраженном (коде Грея) двоичных кодах и двоичном коде на основе безизбыточных кодовых колец, а также кодов, построенных с избыточностью, двоично-сдвинутого кода и кодов на основе кодовых колец, единичного позиционного кода и единичного кода с повторением и инверсией. Учитывались свойства первичного кода (табл.1): позиционный (П) и однопеременный ОК) код и цикличность (Ц) строк матрицы кодовых комбинаций. Устранение неоднозначности считывания производилось методами двойной щетки, V-щетки и однопеременного кодирования (ОК) [4].

Сложность структуры оценивалась числом считывающих элементов ($N_{СЭ}$), числом кодовых дорожек ($N_{КД}$), объемом оборудования (далее объемом), дешифратора (ДШ), осуществляющего перекодировку, и точностью изготовления Δ.

Как явствует из табл. 1, между свойствами первичных кодов, используемых при построении кодовых масок (кодовых шкал), и конструктивно-технологическими параметрами, характеризующими сложность структуры преобразователя, существует определенная взаимосвязь, которая может быть эффективно использована при решении задач оптимизации блочно-модульных структур ЦПП. Так, безизбыточные позиционные коды уменьшают объем дешифраторов и количество кодовых дорожек. Безизбыточный отраженный позиционный код (ОК Грея) в сравнении с нормальным двоичным кодом упрощает считывающую систему. Комбинаторные коды кольцевого кодирования на основе кодовых колец значительно уменьшают число кодовых дорожек, но усложняют считывающую систему и дешифратор, что обусловлено цикличностью таблицы кодовых комбинаций, число строк которой равно числу СЭ, а число столбцов – числу квантов H кодовой шкалы. Сопоставление методов устранения неоднозначности считывания показывает, что с точки зрения точностных требований методы равноценны, однако в случае ОК требуется в два раза меньше СЭ. Значительно снижаются точностные требования к старшим разрядам в случае применения модификации двойной щетки (V-щетки).

Таким образом, каждый из альтернативных базовых вариантов построения обладает недостатками, препятствующими применению в чистом виде, так как при этом в ряде применений, как правило, не обеспечиваются заданные характеристики

преобразования. Вместе с тем выявлено, что уменьшение объема ДШ достигается применением позиционных кодов, числа СЭ – применением ОК, а числа КД – шкал на основе кодовых колец.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика эффективности первичных кодов, используемых в кодовых масках

Первичный код				Метод считывания	Сложность структуры		
Тип двоичного кода	Свойства кода и матрицы кодовых комбинаций				$N_{КД}$	$N_{СЭ}$	Δ
	П	ОК	Ц				
Позиционный безизбыточный	+	–	–	двойной щетки	n	2n–1	≤ 0,5q
	+	–	–	V-щетки	n	2n–1	$\leq 0{,}25q_l$
Позиционный двоично-сдвинутый	+	–	–	двойной щетки	2n	2n–1	≤ 0,5q
	+	–	–	V-щетки	2n	2n–1	$\leq 0{,}25q_l$
Позиционный безизбыточный отраженный	+	+	–	ОК	n	n	≤ 0,5q
Безизбыточный кольцевого кодирования	–	–	+	двойной щетки	2	2n–1	≤ 0,5q
Позиционный единичный	+	–	+	с перекрытием зон считывания	1	2^n	≤ 0,5q
Единичный инверсный	–	+	+	ОК	1	2^{n-1}	≤ 0,5q

Синтез обобщенных структур

Возможности комбинирования известных базовых принципов построения ЦПП пространственного кодирования открываются организацией параллельных каналов преобразования, в каждом из которых производится преобразование перемещения в соответствующую группу разрядов выходного кода, что связано с представлением цифрового эквивалента N в обобщенной позиционной системе счисления [18], группы разрядов которых представляют собой двоичный код его разрядных цифр

$$N = \left(N_1, \ldots, N_l, \ldots, N_p\right) \in \{0, 1, \ldots, H-1\},$$

где $N_l \in \{0, 1, \ldots, H_l - 1\}$ – цифра l-го разряда. При этом функция преобразования l-го канала представляет собой периодическую функцию с периодом $D_l = H_l q_l$:

$$N_l = Ent\left[H_l Fr\left[\frac{x}{D_l}\right]\right] = Ent\left[\frac{x}{D_l}\right] mod\, H_l,\ l = \overline{1, p},$$

где период первого канала равен диапазону всего ЦПП $D_1 = D$.

В частном случае выбора $H_l = 2^{n_l}, l = \overline{1, p}$, выходной код представляет собой n-разрядный двоичный код, l-я группа разрядов которого формируется l-м каналом,

$$n = \sum_{l=1}^{p} n_l .$$

При этом функция преобразования N такого преобразователя может быть найдена преобразованием позиционной системы счисления с основанием H в обобщенную позиционную систему с основаниями $H_l = 2^{n_l}, l = \overline{1, p}$, где $H = \prod_{l=1}^{p} H_l$, что соответствует раз-

биению (декомпозиции) исходной структуры на отдельные субблоки или модули. Откуда следует, что исходные структуры имеют двойственный характер. С одной стороны, их можно трактовать как n-разрядные, с другой, как одноразрядные, формирующие соответствующие группы разрядов, что позволяет их комбинировать в различных сочетаниях.

По сложившейся терминологии ЦПП, осуществляющие параллельное преобразование перемещений несколькими каналами преобразования, названы многоотсчетными [17], где каждый из каналов формирует отсчет соответствующей группы разрядов выходного кода. В этом контексте традиционные преобразователи считывания являются многоотсчетными с числом каналов, равным числу разрядов выходного кода. Поэтому монотонная функция преобразования ЦПП в двоично-(H_1, …, H_l, …, H_p)-ичный код может быть синтезирована как с помощью вышеупомянутых методов устранения неоднозначности, так и методов согласования отсчетов. Следует отметить, что данные термины являются синонимами и обозначают операцию, заключающуюся в обеспечении однозначного соответствия между упорядоченной в функции перемещения последовательностью кодовых комбинаций на выходе преобразователя и заданной таблицей кодовых комбинаций, но реализуемую различно. Операция, обеспечивающая синхронные и синфазные изменения сигналов n-разрядного двоичного кода в соответствии с заданной функцией преобразования в многоотсчетных ЦПП названа согласованием отсчетов потому, что синфазирование осуществляется устранением рассогласования между отсчетами.

Так как преобразователи считывания представляют собой частный случай многоотсчетных преобразователей, общим случаем которых являются ЦПП в двоично-(H_1, …, H_l, …, H_p)-ичный код, если считать p-й и 1-й каналы – точным и грубым отсчетами (ТО и ГО), остальные средними отсчетами (СО), а разряды в преобразователях считывания – отсчетами, блочно-модульные структуры последних будем считать обобщенными.

Согласно вышесказанному обобщенные структуры должны состоять из p отсчетов (далее каналов), основные принципы построения которых обусловлены необходимостью устранения неоднозначности при считывании разрядных цифр в каждом из каналов, а также рассогласования между каналами. В зависимости от метода устранения неоднозначности возможны три типа структур: А, Б и В (рис. 1).

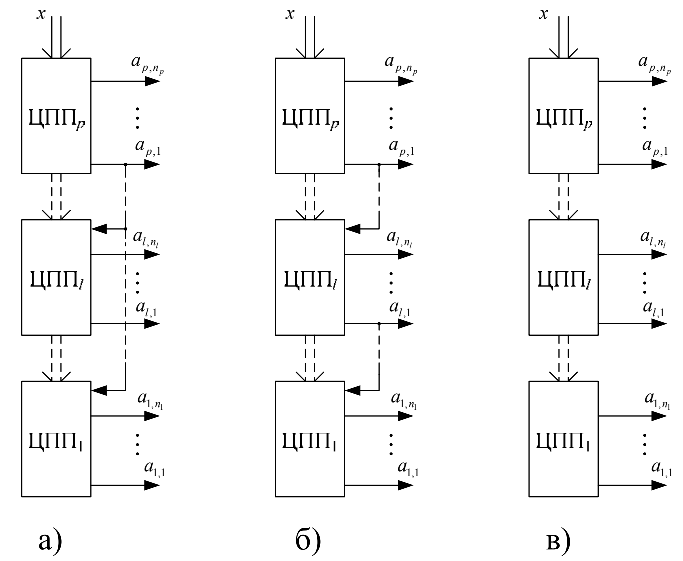


Рисунок 1 – Обобщенные структуры ЦПП с устранением неоднозначности считывания методами двойной щетки (а), V-щетки (б) и ОК (в)

Структура А построена на основе метода двойной щетки (рис. 1а) и состоит из p разрядных ЦППl. Управление считыванием первичного кода во всех каналах $l=\overline{1,p-1}$ осуществляется с помощью сигнала $a_{p,1}$ старшего разряда канала группы младших разрядов. Разряды выходного кода $a_{l,i}\,;\, l=\overline{1,p-1},\ i=\overline{1,n_l}$ формируются мультиплексированием разрядов первичного кода, образуемых компарированием двух групп сигналов кодовых дорожек, сдвинутых относительно начала отсчета

$$a_{l,i}=a'_{l,i}a_{p,1}+a''_{l,i}\,\overline{a}_{p,1}\,,$$

где $a'_{l,i}\,,a''_{l,i}$ – сигналы, сдвинутые на опережение и отставание на $\frac{q_{p-1}}{4}$. Отсюда при $p\geq 2$ допуски на погрешности в каналах старших разрядов в $0{,}5H_p$ раз больше, чем при одноканальном варианте.

В структуре Б на основе метода V-щетки (рис. 1б) сигнал, управляющий считыванием в l-канале, формируется старшим разрядом ЦПП$_{l+1}$, смежного (l+1)-канала. Поэтому допуски на погрешности в каналах старших разрядов значительно расширяются и составляют $\Delta\leq\frac{q_l}{4}$.

Рассмотрим применение в данных структурах в качестве первичных кодов, кодирующих цифры N_l группами двоичных разрядов $a_{l,1},\ldots,a_{l,n_l}$, безизбыточных двоичных кодов мощности H_l. Поскольку требования к точности каналов $l=\overline{1,p-1}$ одинаковы, метод двойной щетки позволяет организовать не более 2 каналов, так как каналы старших разрядов можно рассматривать как один канал, формирующий группу из n–n_p старших разрядов. При этом в случае двоичного нормального кода в группе младших разрядов неоднозначность может быть устранена любым из известных методов. Так, в [19] описан преобразователь считывания с устранением неоднозначности в группе младших разрядов методом V-щетки, а в группе старших разрядов – методом двойной щетки. В сравнении с одноканальным вариантом при этом дополнительно упрощается считывающая система, так как щели диафрагмы располагаются в узком секторе кодовой маски.

Метод V-щетки позволяет организовать $p\geq 2$ каналов. В случае применения безизбыточных двоичных кодов на основе кодовых колец формирование разрядов p группами позволяет вместо одного кодового кольца длины $H=2^n$ использовать p кодовых колец длины $H_l=2^{n_l}\,,l=\overline{1,p}$. Это приводит к значительному упрощению дешифратора, так как вместо дешифратора, объем которого пропорционален $H=\prod_{l=1}^{p}H_l=2^n$, используется p дешифраторов с объемом, пропорциональным $\sum_{l=1}^{p}H_l$. Однако пропорционально числу каналов увеличивается также количество кодовых дорожек $N_{\text{КД}}=p+1$.

В структуре В разряды выходного кода считываются напрямую с кодовой маски, закодированной ОК, однако допуски к погрешностям одинаковы для всех разрядов $\Delta\leq\frac{q_p}{2}$ и для безизбыточных ОК возможны только одноканальные структуры, но ОК с избыточностью позволяют организовать $p\geq 2$ каналов, что значительно уменьшает число СЭ при заданной мощности кода. При этом большой интерес представляют ОК, порождаемые кодовыми кольцами, позволяющие уменьшить число КД в сравнении со случаем применения нормальных двоичных кодов. Из таблицы единичного инверсного

кода, состоящего из $0{,}5H_l$ нулей и единиц, следует, что канал старших разрядов должен иметь $0{,}5H_l$ СЭ, а каждый l-й канал для $l = \overline{2, p}$ $- H_l - 1$ СЭ, считывающих сигналы с l-й КД. Их кодовым участкам, имеющим шаг q_l, соответствуют кодовые кольца длины $\prod_{l=1}^{l} H_l$, состоящие из $0{,}5\prod_{l=1}^{l-1} H_l$ идентичных кодовых колец 00…011…1 длины $2H_l = 2^{n_l}$. При этом общее число СЭ

$$N_{СЭ} = \frac{H_1}{2} + \sum_{l=2}^{p}\left(H_l - 1\right) = \sum_{l=1}^{p} 2^{n_l} - \left(2^{n_1 - 1} + p - 1\right); H_l = 2^{n_l}.$$

Выражение характеризует собой структуру с кодовой маской в ОК, частными случаями которой являются известные структуры. Поэтому, варьируя числом каналов p и числом разрядов n_l в каналах, можно оптимизировать структуру по числу КД за счет увеличения числа СЭ в допустимых пределах.

Так, в случае $n_l = n_1 - 1; l = \overline{2, p}$ получим структуру, характеризуемую соотношением $N_{СЭ} = \left(2^{n_1 - 1} - 1\right)p + 1;\ n = \left(n_1 - 1\right)p + 1$, в которой частные кодовые кольца во всех каналах имеют одинаковую длину $H_1 = 2^{n_1}$.

Частными случаями данной структуры при $p = n$ и $p = 1$ являются известные преобразователи с кодовой маской Грея и кодовым кольцом длины $H = 2^n$, а также преобразователь угла [20] в 7-разрядный код Грея при выборе $p = 3, n_1 = 3$, $n_2 = n_3 = 2$ и $N_{СЭ} = 10$, в котором число СЭ уменьшено в 6,4 раза в сравнении с одноканальным аналогом.

Таким образом, показано, что формирование разрядов в соответствии с представлением N в обобщенной отраженной или нормальной позиционной системе счисления с использованием традиционных методов считывания позволяет в зависимости от используемого первичного кода снизить требования к точности выполнения каналов, уменьшить объем оборудования ДШ, число КД и СЭ. Однако недостатки одноканальных вариантов, связанные с используемыми методами считывания, по-прежнему не устраняются.

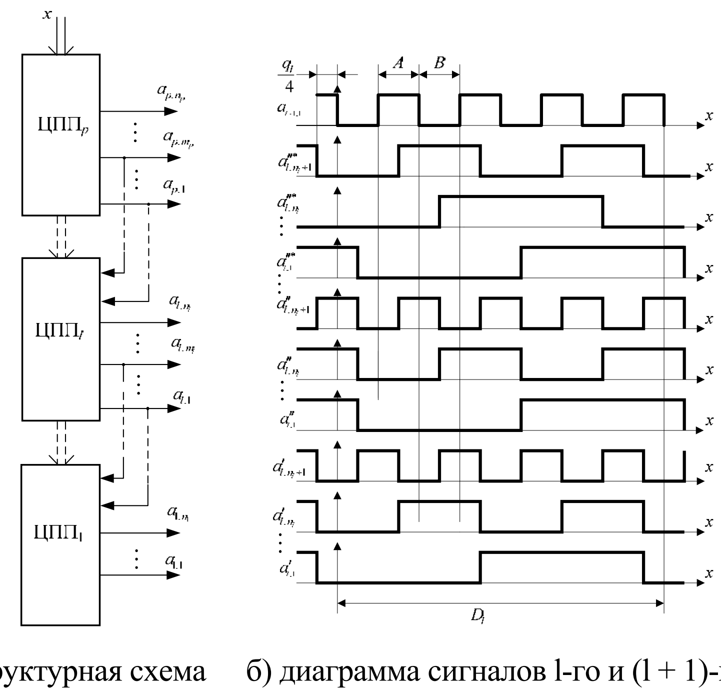
В связи с этим проанализируем случай считывания разрядных цифр в каналах в ОК и устранения рассогласования каналов методом V-щетки. Сравнительный анализ устранения неоднозначности считывания в l-м канале методами ОК и V-щетки показал, что для того, чтобы требования к точности l-го канала были ниже, чем к (l+1)-му каналу, во-первых, необходимо осуществлять преобразование в обычной системе счисления. Во-вторых, для устранения неоднозначности считывание должно производиться последовательно группами, начиная с группы младших разрядов, как в случае V-щетки. В-третьих, границы кодовых участков функции преобразования l-го канала должны задаваться границами кодовых участков (l+1)-го канала. В-четвертых, первичный код должен быть ОК. В-пятых, чтобы сформировать первичным кодом n_l-разрядный выходной код l-го канала кодовыми участками, границы которых определяются сигналом (l+1)-го канала, он должен быть избыточным.

Так, в случае V-щетки используется $2n_l$-разрядный первичный код мощности $2H_l$, эквивалентный (n_l+1)-разрядному двоичному нормальному коду. Поэтому, сформировав функцию преобразования $N_l^{*''}$ в ОК со сдвигом на отставание на $\frac{q_l}{4}$, может быть получен нормальный двоичный n_l-разрядный код. Число разрядов ОК должно быть равно n_l+ 1. При этом число СЭ уменьшается в два раза. Для устранения неоднозначности V-щеткой функция N_l'' может быть получена преобразованием кода Грея $N_l^{*''}$ в нормаль-

ный двоичный код, а функция N_l' может быть получена сдвигом N_l'' в сторону опережения на $\frac{q_l}{2}$ прибавлением +1. Схему можно упростить, совместив операции сложения и логического выбора N_l' или N_l'', формируя N_l с помощью сумматора двоичных чисел [21].

Таким образом, упрощение считывающей системы l-го канала при одновременном снижении точностных требований достигается в случае первичной характеристики, формируемой в ОК мощности $2H_l$ и смещенной на отставание на $\frac{q_l}{4}$, и последующей коррекции значащих разрядов нормального двоичного кода канала на +1. Известный метод согласования отсчетов коррекцией характеристики на ±1 или +1 можно рассматривать как развитие метода двойной щетки на случай, когда характеристики преобразования сдвигаются сумматором двоичных чисел, а зоны считывания формируются несколькими старшими разрядами (l+1)-го канала. Причем ширина зон считывания составляет $\frac{q_l}{2^m}$, что позволяет увеличить допуски на погрешности l-го канала [13] до $\Delta \le \frac{q_l}{2}\left(1-\frac{1}{2^{m-1}}\right), m \ge 2$.

ЦПП [22] на основе ОК для первичного кодирования характеристики каждого разряда и коррекцией на +1 значащих разрядов l-го канала старшими разрядами (l+1)-го канала имеют структуру (рис. 2а), представляющую собой общий случай преобразователей с организацией связи между каналами методом обобщенной V-щетки.



а) структурная схема б) диаграмма сигналов l-го и (l + 1)-каналов для m=1

Рисунок 2 – Структура ЦПП с устранением не однозначности в каналах считыванием ОК, а рассогласования между каналами V-щеткой, реализуемой коррекцией на +1 значащих разрядов l-го канала: $a_{l,1},\ldots,a_{l,ml},\ldots,a_{l,nl}$ – цифры значащих разрядов l-го канала; m_l – число старших разрядов (l+1)-канала, равное числу младших согласующих разрядов l-канала; А, В – зоны считывания двоично-сдвинутого кода

Анализ (рис. 2б) показывает, что (n_l+1)-разрядный ОК, считываемый вместе со старшим разрядом $a_{l+1,1}$ кода (l+1)-го канала, образует (n_l +2)-разрядный ОК мощности $4H_l$. Отсюда следует, что n_l старших разрядов представляют собой значащие разряды выходного кода l-го канала, согласованные с (l+1)-м каналом. Причем N_l можно получить, производя перекодировку N_l^{*} ″ описанным выше образом. Следовательно, метод ассоциативного считывания также представляет собой разновидность метода V-щетки.

Заключение

Таким образом, выявлены пути совершенствования и даны анализ и синтез обобщенных многоотсчетных структур ФЦПП пространственного кодирования и классификация, учитывающая структуру кодовой маски и метод устранения неоднозначности и/или согласования отсчетов и отвечающая задачам структурного синтеза и оптимизации.

Литература

1. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Создание интеллектуальных систем автоматизации и управления на основе современных информационных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 4. – С.13-20.
2. Управляющие и вычислительные устройства роботизированных комплексов на базе микроЭВМ: Учеб. пособ. для техн. вузов / В.С. Медведев, Г.А. Орлов, Ю.И. Рассадкин и др. / Под общ. ред. В.С. Медведева. – М.: Высш.шк., 1990. – 239 с.
3. Домрачев В.Г. и др. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справоч. пособ. / В.Г. Домрачев, В.Р. Матвеевский. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.
4. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Э.Н. Асиновский, А.А. Ахметжанов, М.А. Габидулин и др. / Под общ. ред. А.А. Ахметжанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
5. Габидулин М.А. Современное состояние и тенденции развития фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений // Фотоэлектрические цифровые преобразователи угловых и линейных перемещений. Сб. тезисов докл. Всесоюзн. совещ.-семинара. – Ереван: АН Арм. ССР, 1988. – С.32-33.
6. Габидулин М.А. Оптимизация считывающей системы фотоэлектрического цифрового преобразователя угла и скорости // Материалы международной н.-т. конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. – 2007. – С. 189-194.
7. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах: Пер. с англ. В.В. Малова / Под. ред. А.С. Яроменка. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
8. Гитис Э.И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. – Изд. 3-е, перераб. – М.: Энергия, 1975. – 448 с.
9. Фотоэлектрические преобразователи информации / Л.Н. Преснухин, В.Ф. Шаньгин, С.А. Майоров, И.В. Меськин / Под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
10. Клейн М.Л., Морган Г.С., Аронсон М.Г. Цифровая техника для вычислений и управления: Пер. с англ. Л.А.Чаракова / Под ред. В.Б. Ушакова. – М.: Изд. ИЛ, 1960. – 386 с.
11. Филиппов В.Г. Цифраторы перемещений. – Воениздат, 1965. – 144 с.
12. Коротков С.В., Максимов В.П., Мясников В.А. О согласовании отсчетов в многоотсчетных преобразователях «вал-цифра» // Автоматизированный электропривод. – Л.: Наука, 1965.
13. Горяинов О.А., Габидулин М.А. Согласование отсчетов в многоотсчетных преобразователях угол-код // Техника преобразования информации. Сб. научн. тр. – М.: МИРЭА, 1975. – Вып. 83. – С. 17-23.
14. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: Принципы построения, теория точности, методы контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
15. Мольнар А.Г. О структуре кодовых масок для преобразователей угла в код // Устройства и системы автоматики. Сб. научн. тр. – М.: МИЭМ.– 1972. – Вып. 26. – С. 81-85.
16. Шарин Ю.С., Либерман Я.Л., Анахов В.Я. Комбинаторные шкалы в системах автоматики. – М.: Энергия, 1973. – 112 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 491)

17. Горяинов О.А., Габидулин М.А. Методы построения, современное состояние и основные направления развития преобразователей угловых и линейных перемещений в двоичный код // Техника преобразования информации. Сб. научн. тр. – М.: МИРЭА, 1975. – Вып. 83. – С. 3-12.
18. Габидулин М.А. Формализованный синтез обобщенных структур блочно-модульных абсолютных цифровых преобразователей перемещений // 56НТК МИРЭА. Сб. трудов. – М.: МИРЭА, 2006. – Ч. 3. – С. 59-64.
19. Кодовые измерительные угловых перемещений // Контрольно-измерительная техника. – М.: 1984. – № 23. – С. 20-25. – (Экспресс-информация).
20. А.С. 149949 СССР. Способ рефлексного кодирования угловых перемещений / Л.В. Жданов // Открытия. Изобретения. – 1962. – № 17.
21. Габидулин М.А., Драгонер В.В. Теоретический анализ возможности согласования отсчетов в многоотсчетных цифровых преобразователях перемещений с помощью сумматоров // Исследования новых микроэлектронных приборов и устройств. Вопросы электроники: межвуз. сб. научн. тр. – Кишинев: Штиинца, 1987. – С. 90-93.
22. А.С. 959122 СССР. Фотоэлектрический преобразователь угла поворота вала в код / М.А. Габидулин, П.С. Плотников, А.В. Киселев и др. // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 34.

М.А. Габідулін

Фотоелектричні цифрові перетворювачі переміщень просторового кодування

Роглянуті шляхи удосконалення фотоелектричних цифрових перетворювачів переміщень просторового кодування. Подані аналіз і синтез їх узагальнених структур.

M.A. Gabidulin

Photo-electric Digitizers of Movings of Spatial Coding

Ways of perfection of photo-electric digitizers of movings of spatial coding are considered. Analysis and synthesis of their generalized structures are given.

Статья поступила в редакцию 10.07.2008.